

曲轴轴颈损伤表面的激光熔覆再制造修复

封 慧^{1,2} 李剑峰^{1,2} 孙 杰^{1,2*}

¹ 山东大学机械工程学院, 山东 济南 250061
² 山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东 济南 250061

摘要 为了实现发动机曲轴的激光熔覆再制造修复,采用激光熔覆技术在曲轴材料 45# 钢样板表面制备铁基激光熔覆层,研究了熔覆层的性能,利用光学显微镜和显微硬度计进行了熔覆层金相组织观察和硬度测试。试验结果表明,熔覆层与基体结合良好,且熔覆层硬度为基体硬度的 2~3 倍;为了使曲轴在绕主轴颈旋转情况下对多拐曲轴连杆轴颈进行激光熔覆,提出了在连杆轴颈表面获得连续均匀熔覆层应满足的条件,并在满足这些条件的前提下,推导出了激光熔覆曲轴连杆轴颈过程中激光束与转动轴颈的运动轨迹和相对速度之间的关系模型,通过试验,验证了轨迹模型的可行性。

关键词 激光光学; 激光熔覆; 铁基合金; 显微组织; 硬度; 曲轴连杆轴颈

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0803003

Study on Remanufacturing Repair of Damaged Crank Shaft Journal Surface by Laser Cladding

Feng Hui^{1,2} Li Jianfeng^{1,2} Sun Jie^{1,2}

¹ School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China
² Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Minister of Education, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China

Abstract In order to achieve the laser cladding remanufacturing on engine crankshaft, the iron-based coating on 45# steel has been obtained by laser cladding. Properties of the cladding layers have been investigated. The morphology and microstructure of layers are observed by an optical microscope. The hardness of layers is tested by a Vickers hardness tester. It is observed that the layer and substrate has a good metallurgical bond. Average hardness of the cladding layer is 2~3 times of that of the substrate. In order to realize the laser cladding for the crankshaft rod journal while the crankshaft is rotating around the principal axis, the requirements to obtain the continuous and uniform cladding are proposed. Under the conditions, the trajectory of laser beam and rotating journal and their relative speed during laser cladding are deduced, and the feasibility of the model is verified by the experiment.

Key words laser optics; laser cladding; iron-based alloy; microstructure; microhardness; crankshaft rod journal

OCIS codes 140.3460; 140.3470; 160.3900

1 引 言

再制造技术是以损伤、报废零部件作为毛坯,采用专门的技术和工艺,使损伤的零件恢复原有或近形尺寸,而且性能达到或超过原基材水平^[1]。激光

熔覆作为再制造的主要修复技术之一,具有以下优点:熔覆层与基体冶金结合;基体对熔覆层的稀释率小并可控制;基体变形小^[2-3]。曲轴在长期的运转过程中,轴颈会出现磨损和裂纹,若采用喷涂技术修

收稿日期: 2014-01-22; 收到修改稿日期: 2014-01-28

基金项目: 校企合作项目(11381327)

作者简介: 封 慧(1988—),女,硕士研究生,主要从事激光熔覆修复方面的研究。E-mail: fengyan1997@126.com

导师简介: 李剑峰(1963—),男,博士,教授,主要从事绿色设计和绿色制造等方面的研究。E-mail: ljf@sdu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: sunjie@sdu.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

复,存在界面结合强度弱、涂层内有孔隙等问题,而激光熔覆技术由于能量密度高等特点可以消除涂层内的缺陷,且界面结合强度高^[4]。

李养良等^[5]在 45# 钢基体上激光熔覆 Fe 基合金粉末,研究扫描速度对熔覆层组织和耐磨性能的影响;晁明举等^[6]在 45# 钢表面激光熔覆不同 TiO₂ 含量的 Ni 基合金,研究工艺参数和 TiO₂ 含量对熔覆层性能的影响;徐国建等^[7]在不锈钢表面制备 Co 基合金与碳化钒(VC)的功能梯度涂层,研究熔覆层的裂纹敏感性、组织及性能;王云山等^[8]在曲轴曲柄轴面进行了激光淬火和激光表面熔覆,并推导了光斑轨迹方程,给出了编程方法;彭亮^[9]分析了曲轴的磨损原因,并对损伤轴颈表面进行了激光熔覆修复;任会芳等^[10]对因裂纹而导致失效的曲轴进行了激光熔覆再制造,并对修复后的零件进行了温度场、应力场及不同熔覆层残余应力的分析,获得了最佳的熔覆材料。

目前许多学者采用激光熔覆技术在样件上进行了大量的研究工作,但在曲轴轴颈表面的应用研究较少。这主要是因为激光熔覆曲轴的过程中,为了获

得性能良好的熔覆层,激光束的运行轨迹必须与曲轴的运行轨迹相匹配,保证相对速度恒定,且轴颈与曲柄臂之间的过渡圆角是应力集中的部位也是熔覆的难点。本文先在曲轴材料 45# 钢样件上进行熔覆试验,对熔覆层的显微组织、硬度进行观察和测定,在熔覆层性能满足要求的前提下,在 45# 钢曲轴连杆轴颈表面进行熔覆试验,并推导了熔覆过程中曲轴连杆轴颈和激光束的运行轨迹及相对运行速度。

2 样件激光熔覆

2.1 试验设备及材料

激光熔覆试验采用 6 kW 横流 CO₂ 激光器,采用优化的激光熔覆工艺参数,激光功率为 4 kW,扫描速度为 500 mm/min,光斑直径为 3 mm,焦距为 300 mm,多道搭接,搭接率为 40%,预置粉末厚度为 1 mm,不使用粘结剂。基体材料为 45# 钢平板,熔覆所用粉料为 Fe 基自熔性合金粉末,其化学成分如表 1 所示。激光熔覆前先用砂纸打磨基体表面,并用乙醇和丙酮清洗,去除表面的氧化皮和油污。

表 1 铁基合金粉末的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of the Fe-base alloy powder (mass fraction, %)

Element	C	B	Cr	Si	Ni	Mn	Mo	P/S	O	Fe
Content	0.1~0.3	1.1~1.3	14~16	0.9~1.2	1.5~2.5	0.5~1.0	1.1~1.5	≤0.03	≤0.1	Bal.

2.2 试样制备

对熔覆试样按照设定尺寸进行线切割,制作成金相试样,并进行研磨抛光。由于熔覆层比基体耐腐蚀,因此使用质量分数 4% 的硝酸乙醇溶液对基体进行腐蚀,使用质量分数 25% 的硝酸乙醇溶液对熔覆层进行腐蚀。采用光学显微镜观察熔覆层的显微组织。使用维氏硬度计(MH-6)测量熔覆层的显微硬度,所加载荷为 25 gf,加载时间为 5 s,测量至少 3 次,取平均值。

2.3 熔覆层显微组织

图 1 为熔覆层的横截面形貌,从图中可以看出,横截面分为 3 部分,即熔覆层、结合区和基体。熔覆层组织致密,未出现裂纹、气孔等缺陷。为了更好的反应熔覆层与基体的结合方式,对试样横截面进行了线扫描,并测定了 Cr 元素的分布趋势,如图 2 所示。在 45# 钢基体中 Cr 的含量小于等于 0.25%,激光熔覆 Fe 基粉末中 Cr 的含量为 14%~16%,根据图中 Cr 元素在交界面处的变化趋势,可以看出在熔覆层与基体交界面处发生了元素的扩散,这说明熔覆层与基体实现了良好的冶金结合。图 3 为熔覆

层不同部位的显微组织,从图中可以看出熔覆层的组织变化依次为熔覆层与基体交界面处的胞状晶、柱状枝晶、接近熔覆层表面的树枝晶。这是因为熔覆层的组织形态主要由结晶方向上的温度梯度 G_L 与凝固速度 R 的比值控制。在熔池快速冷却的过程中,熔覆层与基体交界面处 G_L/R 趋向于无穷大,随着到熔覆层表面距离的减小, G_L/R 比值逐渐减小,在合金成分一定的条件下,随着 G_L/R 比值的减小,熔覆层组织从平面晶、胞状晶向树枝晶转变^[11]。

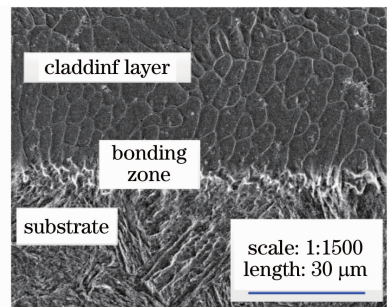


图 1 熔覆层横截面组织($P=4$ kW, $V_s=500$ mm/min)

Fig. 1 Cross-section microstructure of cladding layer ($P=4$ kW, $V_s=500$ mm/min)

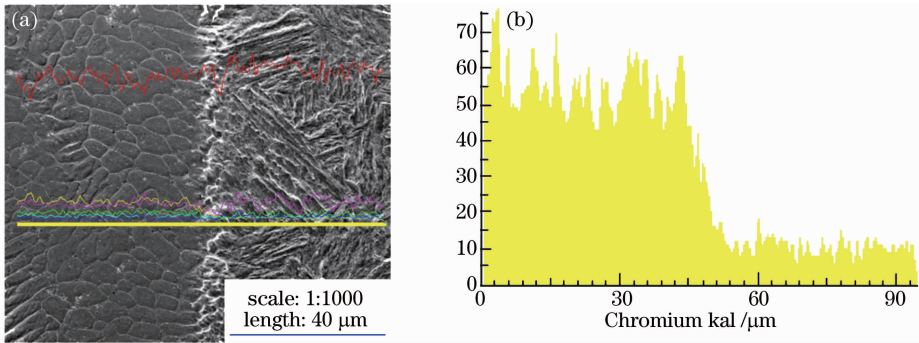


图 2 熔覆层横截面元素分布

Fig. 2 Element distribution in the cross-section of cladding layer

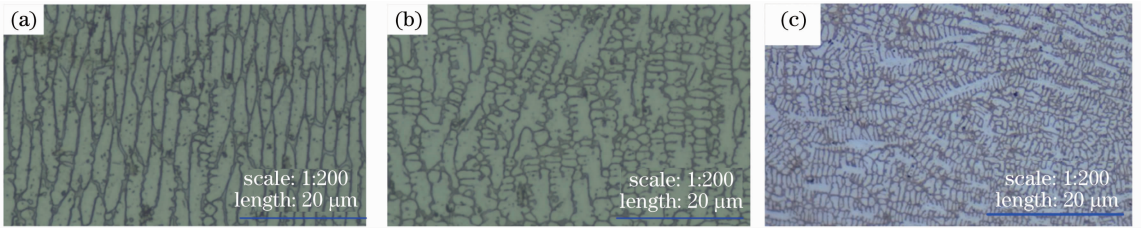


图 3 熔覆层不同部位组织 ($P=4\text{ kW}$, $V_s=500\text{ mm/min}$)。 (a) 熔覆层底部; (b) 熔覆层中部; (c) 熔覆层顶部

Fig. 3 Microstructure of the cladding layer in different regions ($P=4\text{ kW}$, $V_s=500\text{ mm/min}$).

(a) Bottom; (b) middle; (c) top

2.4 熔覆层硬度

图 4 为硬度测试的压痕形状。图 5 为试样块横截面硬度的变化曲线。图 5 中横坐标为被测点到熔覆层表面的垂直距离, 纵坐标为被测点的硬度值。

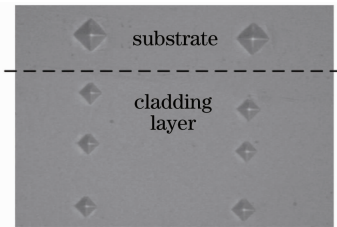


图 4 熔覆层横截面压痕图片

Fig. 4 Transverse cross-section indentation morphology of cladding layer

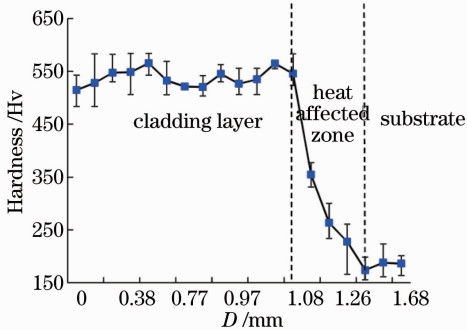


图 5 熔覆层横截面显微硬度

Fig. 5 Transverse cross-section microhardness of the laser cladding layer

从图 5 中可以看出, 熔覆层的硬度比基体高, 是基体的 2~3 倍, 这主要是因为激光熔覆过程中熔池快速凝固使熔覆层的晶粒细化, 组织致密, 起到了很好的晶界强化作用。

3 曲轴连杆轴颈激光熔覆

3.1 轨迹分析及计算

3.1.1 基本条件

在激光熔覆曲轴的过程中, 曲轴连杆轴颈以主轴颈中心线为基准做圆周运动。为了在连杆轴颈表面获得连续均匀的熔覆层, 应该满足如下条件: 1) 激光头到工件表面的距离不变; 2) 激光束与连杆轴颈相对运行速度恒定; 3) 在激光熔覆过程中, 激光束要始终处于曲轴连杆轴颈的最上端。

3.1.2 激光束位置

采用西门子数控机床, 实现 x, y, z 三根轴中任意三轴的同时运动。在激光熔覆过程中, 曲轴水平放置在机床上, 无偏心, 并绕主轴轴心在 yz 平面内做圆周运动; 激光束的运动轨迹为螺旋线, 即在 yz 平面内做圆周运动, 同时在 x 方向上做直线运动。熔覆过程中曲轴连杆轴颈的起始位置、激光束及送粉喷嘴的位置如图 6 所示。

3.1.3 激光轨迹确定及光斑扫描速度计算

激光熔覆曲轴连杆轴颈时, 连杆轴颈绕主轴颈

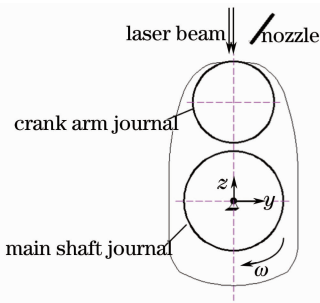


图 6 激光熔覆曲轴连杆轴颈初始位置

Fig. 6 Start point of laser cladding on the crank arm journal
 圆心做圆周运动,即不同时刻连杆轴颈同一点处在不同的位置,所以激光束随着轴颈的运动而运动,且激光束总是位于连杆轴颈的最上方,其轨迹曲线如图 7 所示。

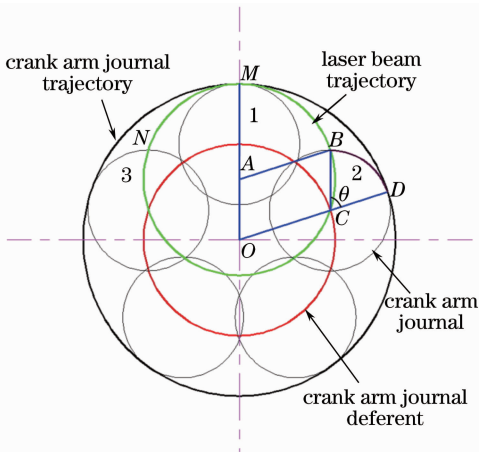


图 7 激光熔覆过程轨迹曲线

Fig. 7 Trajectory curve during laser cladding

在熔覆过程中,当主轴颈以一定的角速度转动时,曲轴连杆轴颈的位置也在时刻变化。图 7 为激光熔覆过程中激光束和轴颈的的轨迹曲线,图中绿色线表示激光束的运动轨迹,直径最大的圆表示连杆轴颈的运动轨迹,红色线表示连杆轴颈中心线的运动轨迹。

为了在曲轴连杆轴颈表面获得成分均匀且没有缺陷的熔覆层,保证激光束与曲轴连杆轴颈相对运动速度的恒定是非常重要的。在激光熔覆的过程中,连杆轴颈的位置是时时变化的,且激光束始终处于连杆轴颈的最上端。在图 7 中,激光束轨迹的圆心为 A 点,连杆轴颈运动轨迹的圆心为 O 点,此刻连杆轴颈的圆心为 C 点,设连杆轴颈的半径为 r_1 ,激光束轨迹的半径为 r_2 ,连杆运动轨迹的半径为 r_3 ,连杆轴颈中心线运动轨迹的半径为 r_4 ,曲轴主轴颈的角速度为 ω 。当曲轴连杆轴颈从 M 点转动到 D 点时,激光束从 M 点转动到 B 点,激光束在连杆轴颈上的

加工轨迹为 \widehat{BD} , 设为 s 。在图 7 中,激光束轨迹与连杆中心线运动轨迹的半径相等,即 $r_2 = r_4$,且连杆轴颈的半径等于连杆运动轨迹半径与连杆中心线运动轨迹的半径之差,即 $r_1 = r_3 - r_4 = r_3 - r_2$ 。在相同时间内,曲轴主轴颈、连杆轴颈和激光束转过的角度是相同的,即 $\angle MAB = \angle MOD = \angle BCD = \angle \theta$, 则

$$s = r_1 \times \theta = r_1 \times \omega \times t, \quad (1)$$

$$v = \frac{s}{t} = r_1 \times \omega = (r_3 - r_2) \times \omega, \quad (2)$$

式中 v 为激光束相对曲轴连杆轴颈的移动速度。设 D_2, D_3 分别为激光束和连杆运动轨迹的直径,则激光束相对连杆轴颈表面的移动速度为

$$\Delta F = (r_3 - r_2) \times \omega = 2(r_3 - r_2) \times \pi n = (D_3 - D_2)\pi n = \pi \frac{V_s}{\pi D_s} (D_3 - D_2) = \frac{V_s}{D_s} (D_3 - D_2), \quad (3)$$

式中 n 为机床转速, V_s 为曲轴主轴颈的线速度, D_s 为曲轴主轴颈的直径。

根据(3)式可知,在曲轴尺寸一定的前提下,相对运动速度 ΔF 只与转速有关,且曲轴主轴颈与激光束的转速是相同的,因此,保证主轴及激光束匀速转动就可以实现相对运行速度恒定。

在激光熔覆过程中,在扫描速度等其他参数一定的条件下,随着激光功率的增加,熔覆层的高度增大。在熔覆曲轴连杆轴颈过程中,若激光束和曲轴连杆轴颈的运行速度没有匹配好,会改变激光头到工件表面的距离,引起激光功率的变化,从而影响熔覆层的形貌。以激光运行速度小于连杆运行速度为例,在图 7 中,连杆轴颈从位置 1 运动到位置 2 的过程中,若两者的速度匹配完好,则激光束应该从 M 点运动到 B 点,若激光束运行速度慢,在连杆到达位置 2 时,激光束位于 M 点与 B 点之间的位置,则激光头到工件表面的距离变大;同理,在运动轨迹的后半个圆周,在连杆运动到位置 3 时,激光束还未到达 N 点,则激光头到工件表面的距离变小。图 8 是在激光束和曲轴连杆速度没有匹配好的情况下获得

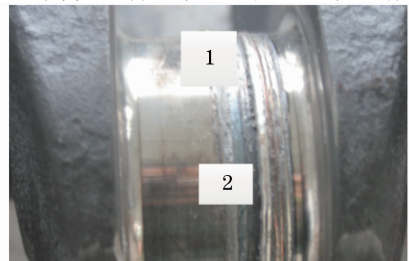


图 8 熔覆层宏观图片

Fig. 8 Photograph of cladding layer

的熔覆层图片,从图 8 中可以看出,熔覆层的厚度不均匀,熔覆层位置 2 处的高度明显大于位置 1 处。

3.2 激光熔覆曲轴连杆轴颈试验

将曲轴水平固定在机床上,调整曲轴连杆轴颈的位置使其在连杆轴颈运动轨迹的最高点,调整激光束到连杆轴颈表面的距离,并使其在轴颈的最上端,如图 9 所示。根据(3)式计算出机床转速 n 和激光头的运行速度 F ,控制曲轴在 yz 平面内的转动及激光头的螺旋线运动。使用 6 kW CO₂ 激光器对曲轴连杆轴颈进行激光熔覆,熔覆后轴颈表面的熔覆层如图 10 所示,磨削后的轴颈表面如图 11 所示。从图 10 和 11 中可以看出,轴颈经过激光熔覆后,熔覆层表面均匀,没有宏观裂纹等缺陷,经过磨削加工后,轴颈表面光滑、明亮,无裂纹和气孔等缺陷。

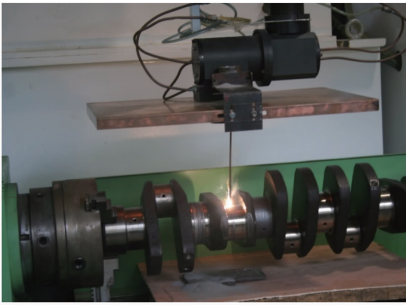


图 9 激光熔覆试验图

Fig. 9 Laser cladding process

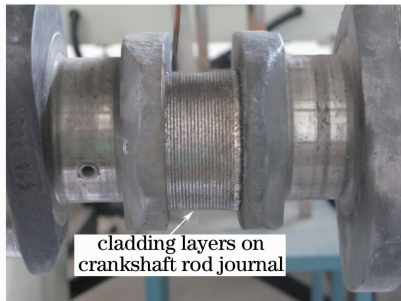


图 10 曲轴连杆轴颈表面熔覆层

Fig. 10 Cladding layers on the crankshaft rod journal

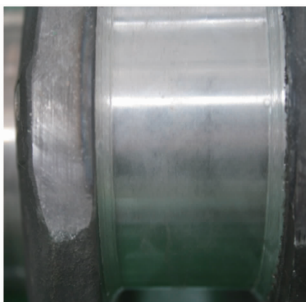


图 11 磨削加工后的轴颈表面

Fig. 11 Surface after grinding

4 结 论

1) 熔覆试样块中熔覆层和基体形成了良好的冶金结合,熔覆层的组织致密无缺陷,熔覆层硬度明显高于基体。

2) 激光熔覆曲轴连杆轴颈时,为了获得良好的熔覆层必须满足以下 3 个条件:激光头到工件表面的距离不变;激光光斑与连杆轴颈相对运行速度恒定;在激光熔覆过程中,激光束要始终处于曲轴连杆轴颈的最上端。

3) 推导了曲轴在绕主轴转动条件下,激光熔覆过程中激光束与连杆轴颈的运动轨迹和相对运动速度,并通过试验验证了可行性。

参 考 文 献

- 1 Yang Xichen, Li Huishan, Liu Yunwu, *et al.*. Laser remanufacturing technology and its industrial application [J]. *China Surface Engineering*, 2003, 61(4): 43-46.
杨洗陈,李会山,刘运武,等.激光再制造技术及其工业应用[J].*中国表面工程*, 2003, 61(4): 43-46.
- 2 Xu Bo, Tian Wei. The geometrical features of single laser cladding for the green remanufacturing[J]. *Applied Laser*, 2010, 30(4): 254-258.
许波,田威.面向绿色再制造的单道激光熔覆几何特征研究[J].*应用激光*, 2010, 30(4): 254-258.
- 3 Feng Shurong, Zhang Shuquan, Wang Huaming. Wear resistance of laser clad hard particles reinforced intermetallic composite coating on TA15 alloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(2): 0203002.
冯淑蓉,张述泉,王华明.钛合金激光熔覆硬质颗粒增强金属间化合物复合涂层耐磨性[J].*中国激光*, 2012, 39(2): 0203002.
- 4 Gao Xuesong, Huang Yinhui, Tian Zongjun, *et al.*. Erosive wear resistance behavior of laser cladding Al₂O₃ + 13% TiO₂ coating prepared by plasma spraying on titanium alloy surface[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(3): 858-862.
高雪松,黄因慧,田宗军,等.钛合金表面激光熔覆等离子体喷涂 Al₂O₃ + 13% TiO₂ 涂层冲蚀磨损性能[J].*中国激光*, 2010, 37(3): 858-862.
- 5 Li Yangliang, Song Jieguang, Bai Xiaobo, *et al.*. Research on microstructure and wear-resistance property of iron-based alloy laser cladding on 45# steel[J]. *Applied Laser*, 2010, 30(2): 108-110.
李养良,宋杰光,白小波,等.45#钢激光熔覆铁基合金组织及磨损性研究[J].*应用激光*, 2010, 30(2): 108-110.
- 6 Chao Mingju, Liang Erjun, Zhao Dong. Effect of TiO₂ on the laser cladding layers of Ni-based alloy on 45# steel[J]. *Chinese J Lasers*, 2003, 30(10): 947-952.
晁明举,梁二军,赵栋. TiO₂ 对 45# 钢表面激光熔覆镍基合金的影响[J].*中国激光*, 2003, 30(10): 947-952.
- 7 Xu Guojian, Yin Deyang, Hang Zhengxiang, *et al.*. Functionally gradient material coating of co-based alloy and VC using laser cladding[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(6): 061404.
徐国建,殷德洋,杭争翔.激光熔覆钴基合金与碳化钒的功能梯度层[J].*激光与光电子学进展*, 2012, 49(6): 061404.
- 8 Wang Yunshan, Zhang Xingquan, Lei Jianbo, *et al.*. Processing of laser quenching crankshaft[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(4): 574-576.
王云山,张兴泉,雷剑波,等.曲轴激光淬火工艺[J].*中国激*

- 光, 2007, 34(4): 574—576.
- 9 Peng Liang. Application of laser cladding technology in repairing crank-shaft[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2013, (1): 135—136.
彭 亮. 激光熔覆在曲轴修复中的应用[J]. 装备制造技术, 2013, (1): 135—136.
- 10 Ren Huifang, Ren Jialong, Wang Qingxian. Simulation analysis on the laser cladding repair material selection of diesel engine crankshaft crack[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology, 2013, 28(3): 69—72.
任会芳, 任家隆, 王青仙. 柴油机曲轴裂纹激光熔覆修复材料选择的仿真研究[J]. 徐州工程学院学报, 2013, 28(3): 69—72.
- 11 Lu Qinglong, Wang Yanfang, Li Li, *et al.*. Effect of scanning speed on microstructures and properties of laser cladding Fe-based amorphous composite coatings[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0203007.
鲁青龙, 王彦芳, 栗 荔等. 扫描速度对激光熔覆铁基非晶复合涂层组织与性能的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0203007.

栏目编辑: 张浩佳